

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХП»

А.А. КЕЛІН, аспірант, ХПП «Сертифікаційний центр АСУ»

Н.М. ЮДАНОВА, ст. викладач, НТУ «ХП»

ЧУТЛИВІСТЬ ЕМА ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РІЗНОГО ТИПУ

Наведено результати експериментальних досліджень з виявляємості внутрішніх, поверхневих, підповерхневих дефектів імпульсами ультразвукових коливань, які збуджуються і приймаються ЕМАП різного типу. Показано, що чутливість розроблених ЕМА перетворювачів близька до чутливості сучасних контактних датчиків. Розроблені ЕМАП і макет дефектоскопу, що реалізують переваги ЕМА способу контролю при виявленні поверхневих і приповерхневих дефектів металовиробів.

Results of experimental researches on revealing inside, surface, subsurface defects are detected by impulses of ultrasonic oscillations which are excited and accepted by different type of EMA converters. It is shown that sensitivity developed EMA converters close to sensitivity of modern contact gauges. Developed EMA converters and a model of defectoscope which realise advantages of EMA testing at revealing surface and subsurface defects of metalware.

Вступ. Електромагнітне-акустичний (ЕМА) спосіб збудження і прийому пружних коливань у своїй галузі застосування має значні переваги в порівнянні з контактним [1-2]. Головною причиною стримування його широкого використання в промисловості вважається недостатня чутливість [3-4]. Питанню підвищення чутливості було присвячено багато робіт, наприклад [5-8]. Однак дані про досягнуту чутливість ЕМА приладів досить суперечливі [9-10]. Отже, подальші дослідження в цьому напрямку, в першу чергу експериментальні, є актуальними.

Основна частина. В роботі [11] показано, що для підвищення чутливості ЕМА приладів потрібні розробки в двох основних напрямках. Перше - підвищення чутливості аналогової частини дефектоскопа, товщиномірів та пристроїв для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Друге - використання сучасних методів формування інформаційних сигналів та обробки прийнятої інформації. Особливо це важливо при ультразвуковому контролі методом відлуння [1].

Ефективність підвищення можливостей аналогової частини ЕМА приладів. У першому напрямку потрібно поліпшення характеристик ЕМА перетворювачів (ЕМАП), генераторів зондуючих імпульсів (ГЗІ) і попередніх підсилювачів (ПУ). При цьому обов'язковим є комплексне узгодження згаданих вузлів між собою та з контрольованим виробом. Про конкретні приклади реалізації ефективних ЕМАП, ГЗІ і ПУ повідомлено в роботі [11]. Нижче наведено експериментально отримані дані при контролі методом відлуння прямими, похилими ЕМАП і ЕМАП для контролю поверхневими хвилями. На рис.1 показані реалізації із зображенням відлуння сигналів від

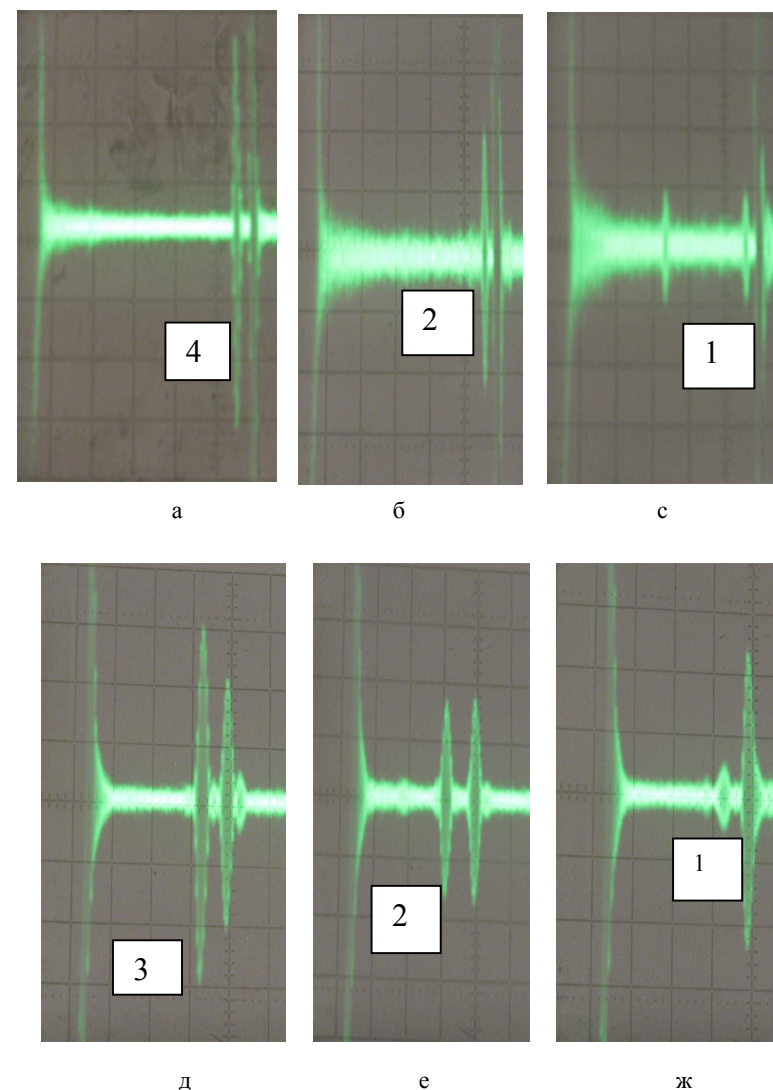


Рис.1. Реалізації з відлуннями, які прийняті з рейкового взірця з дисковими відбивачами. Діаметри моделей дефектів вказані на рисунку. Зображення а, б і с – з зони обмеженої товщиною шийки (контроль з поверхні головки рейки). Зображення д, е і ж – при контролі головки рейки з бокової грані.

відбивачів різного розміру в нетермічнооброблених рейках (високовуглецева сталь У7 з вмістом кремнію близько 1,05%).

При контролі зверху (зона, обмежена товщиною шийки; плоскодонні відбивачі виготовлені з боку підшви на глибину 12-15 мм) і при контролі з бічної грані головки рейки (плоскодонні відбивачі виготовлені з боку протилежної по відношенню до ЕМАП бічній грані головки). При вимірах прямим поєднанням ЕМАП його індуктор містив 18 витків дроту діаметром 0,2 мм, індукція поля подмагнічування становила 1,1 Тл, напруга, що розвивається ГЗІ, становило 870 В, відстань між індуктором і поверхнею рейки - 0,2 мм. Робоча зона ЕМАП - $6 \times 15 \text{ мм}^2$. Збуджувалися імпульси лінійно поляризованих зсувних коливань тривалістю 6 періодів з частотою заповнення 2,5 МГц. Вектор поляризації при контролі був орієнтований перпендикулярно площині симетрії рейки. На рис. 1, 1д, 1е, 1ж масштаб по амплітуді 20 мВ/поділ, на рис. 1б і 1с - 10 мВ/поділ, по часу на рис. 1а, 1б, 1с - 20 мкс/поділ, на рис. 1д, 1е, 1ж - 10 мкс/поділ. Відразу за імпульсами відлуння від моделей дефектів на розгортці розташовуються донні імпульси (перші відображені від підшви рейки). Аналіз експериментальних даних, наведених на рис.1 показує, що ЕМА дефектоскоп, з розробленою аналоговою частиною, дозволяє впевнено виявляти в нетермічнооброблених рейках внутрішні дефекти, еквівалентні дисковому відбивачу діаметром 1 мм і більше. Очевидно, що при контролі об'ємнозміцнених рейок або інших виробів з матеріалу з низьким послабленням акустичних імпульсів чутливість може бути вищою.

З огляду на складну конфігурацію поверхні рейки та інших аналогічних за складністю форми виробів, ефективним при їх ультразвуковому контролі можуть бути хвилі Релея. Практичні дані оцінки різних ділянок рейки наведено на рис. 2. При вимірах використані класичні роздільно-суміщені ЕМАП різної конструкції з індукторами типу «зигзаг». Кількість робочих ділянок індукторів вибрано з інтервалу 4 ... 6 шт. Довжина лінійних зон перетворювачів становили від 16 до 24 мм. Тривалість імпульсів ГЗІ становили 4 ... 6 періодів частоти заповнення, яка обрана рівною 1 МГц. Відстань від індукторів ЕМАП до поверхні рейки склало 0,2 мм. Напруга, що розвивається ГЗІ на індукторі ЕМАП, досягало 400 ... 550 В. Об'єктом досліджень був відрізок головки рейки з прилеглими ділянками шийки довжиною близько 25 мм. Інша частина рейки була відрізана. Моделями дефектів служили прямокутні канавки різних розмірів. На рис. 2 наведена реалізація з відлуннями від дефекту $0,5 \times 18 \times 0,15 \text{ мм}^3$, який розташовується на верхній випуклій поверхні головки рейки. При цьому ЕМАП був розміщений на протилежній бічній грані головки (масштаб по амплітуді 100 мВ/поділ, розгортка - 10 мкс/поділ). На рис. 2б та 2в показані реалізації з відлуння від дефектів розмірами $0,4 \times 5 \times 0,15 \text{ мм}^3$ і $0,3 \times 16 \times 0,15 \text{ мм}^3$ відповідно, виготовленими на поверхні катання головки рейки. Масштаб по амплітуді 50 мВ/поділ, розгортка - 10 мкс/поділ. На рисунках 2г, 2д, 2е наведені дані про виявлення дефектів на увігнутий підголовочній поверхні. ЕМАП розташовувався на прилеглий бічній грані головки рейки. На рис. 2г, для

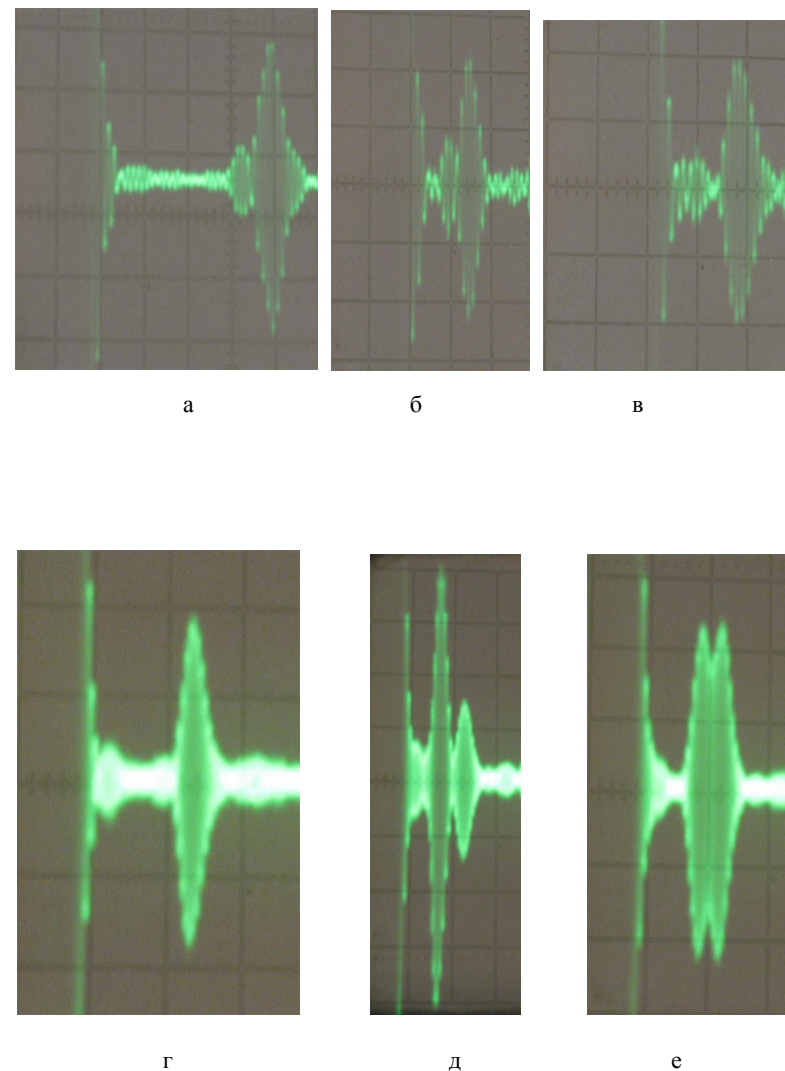


Рис. 2. Реалізації з відлунням, при контролі хвилями Релея, від моделей дефектів, розташованих на плоских та криволінійних ділянках поверхні рейки.

порівняння, дана реалізація бездефектної ділянки з відлунням від торця обрізу в зоні шийки. На рис. 2д наведена реалізація з відлунням від дефекту $0,7 \times 30 \times 0,15 \text{ мм}^3$ на увігнутий підголовочній частині. Наступний за ним

сигнал - від обрізу шийки. Масштаб по амплітуді 100 мВ/поділ, розгортка – 20 мкс/поділ. На рис. 2е показана реалізація відлуння від дефекту $0,4 \times 30 \times 0,15 \text{ мм}^3$, розташованого на відстані 12 мм від торця обрізу. Масштаб той же, що і на попередньому знімку. З аналізу даних, наведених на рис. 2, випливає, що ЕМА дефектоскоп, з дослідженою аналоговою частиною, дає можливість упевнено виявляти на опуклих і увігнутих поверхнях тріщини глибиною більше 0,3 мм. На нашу думку жоден інший метод контролю таких унікальних можливостей не має.

Слід додати, що у всіх досліджених вище випадках поверхню рейок не зачищається від щільно скріпленою з поверхнею металу окалини та іржі, як це вимагається при використанні традиційного ультразвукового контролю.

При контролі зварних швів та інших елементів виробів широко застосовують перетворювачі, які збуджують ультразвукові промені під кутом до поверхні. Повідомлення про використання «похилих» ЕМАП періодично публікуються [1, 9]. Однак, конкретних даних досить мало і вони також суперечливі. Тому були виконані дослідження по чутливості похилих перетворювачів при виявленні моделей дефектів різного типу, рис. 3. Для вимірювань використано роздільно-суміщений ЕМАП з кутом введення пружних коливань 37 градусів [13]. Кількість робочих ділянок збуджуючого і прийомного індукторів - по 6 шт. Тривалість імпульсів ГЗІ - 4 періода частоти заповнення. Частота пружних коливань - 1,56 МГц. На рис.3а і 3б наведені розгортки, отримані на зразку головки рейки типу Р65, описаному вище. ЕМАП сканував обсяг головки і зони шийки з поверхні катання. На рис.3а наведена реалізація з відлунням від моделі дефекту у вигляді канавки $0,9 \times 25 \times 0,15 \text{ мм}^3$, виготовленої поперек головки рейки на поверхні катання. Використано імпульс один раз відбитий від площини обрізу шийки. На рис.3б наведена реалізація з відлунням від відбивача, утвореного отвором діаметром 4 мм і площиною обрізу шийки рейки. Масштаб по амплітуді на рис.3 і 3б - 100 мВ/поділ, за часом - 20 мкс/поділ. Реалізації рис.3в-3е отримані на стандартному зразку СО-2. На рис. 3в наведена реалізація з відлунням від дефекту, утвореного отвором діаметром 6 мм і бічною площиною зразка. На рис. 3г наведена реалізація з відлунням від бічної поверхні отвору діаметром 6 мм того ж зразка. На рис. 3в, 3г масштаб по амплітуді 50 мВ/поділ і 20 мкс/поділ відповідно. На реалізаціях 3д, 3е представлені сигнали від двогранного кута СО-2 при контролі прямим променем - рис.3д (500 мВ/поділ), і при контролі один раз відбитим променем (200 мВ/поділ). З наведених даних випливає, що чутливість при контролі похилим ЕМАП досить висока і, отже, такі перетворювачі можуть застосовуватися для практичного контролю. У той же час необхідно відзначити значну «мертву» зону при контролі такими перетворювачами, яка іноді досягає 20-30 мм. Наявність значної «мертвої» зони відзначають і інші автори при контролі різними типами ЕМА перетворювачів [1, 3].

Для усунення зазначеного недоліку розроблено новий тип ЕМАП, який

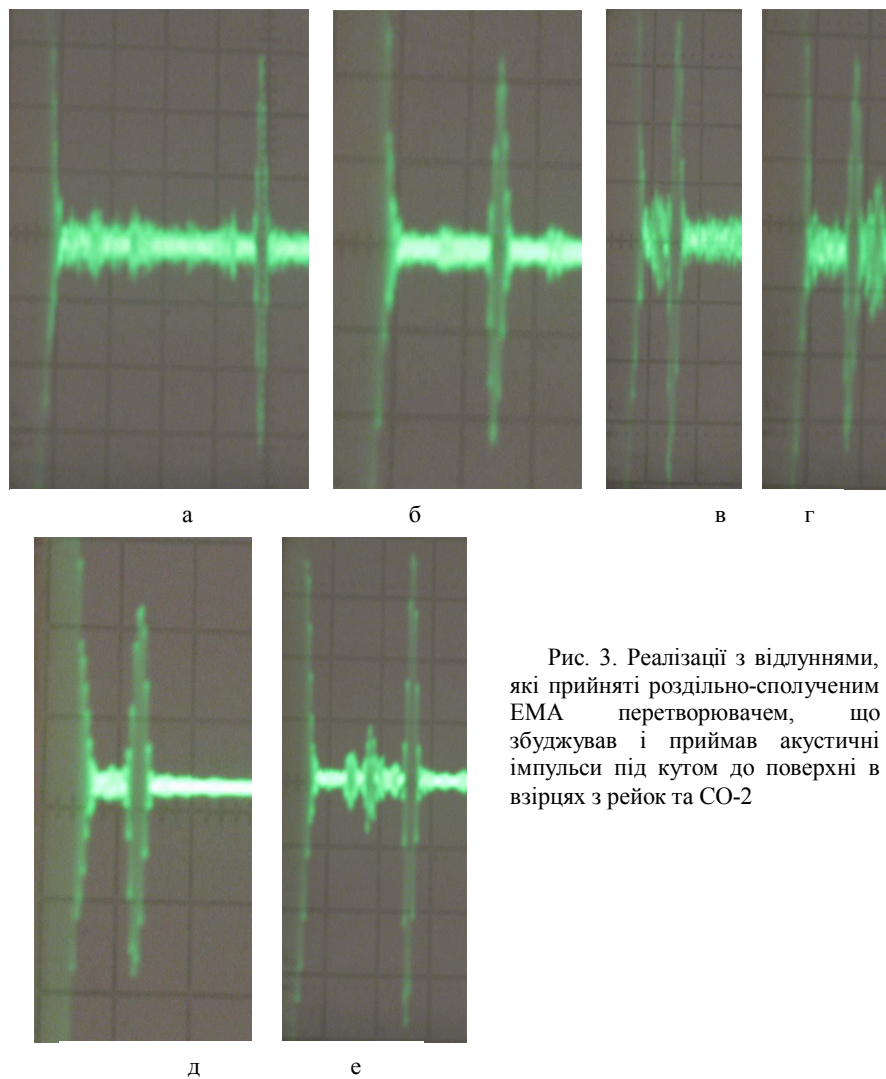


Рис. 3. Реалізації з відлуннями, які прийняті роздільно-сполученим ЕМА перетворювачем, що збуджував і приймав акустичні імпульси під кутом до поверхні в вірцях з рейок та СО-2

дозволяє виконувати контроль виробів без «мертвої» зони. На рис. 4 наведено реалізації, отримані за допомогою згаданого ЕМАП. Частота ультразвукових імпульсів - 1 МГц. Тривалість імпульсів - 4 періоду заповнення частоти зондуючих імпульсів. На рис. 4а - ділянка без дефекту, рис. 4б - ділянка з дефектом на поверхні головки рейки у вигляді прямокутної канавки $0,9 \times 25 \times 0,15 \text{ мм}^3$ (500 мВ/поділ). На рис. 4в - ділянка з дефектом у вигляді

циліндричного свердління діаметром 3 мм, виготовленого на глибині 4 мм від поверхні головки рейки (200 мВ/поділ), на якій встановлювався ЕМАП. З наведених даних випливає, що ЕМАП можна контролювати приповерхневі шари виробів з високою чутливістю. Робоча зона розробленого ЕМА перетворювача досягає 20-30 мм від поверхні введення ультразвуку. При цьому поверхня виробу може бути як плоскою, так і криволінійною.

Слід зазначити, що всі вищенаведені результати представлені після попереднього посилення сигналів без застосування будь-якої обробки прийнятої інформації.

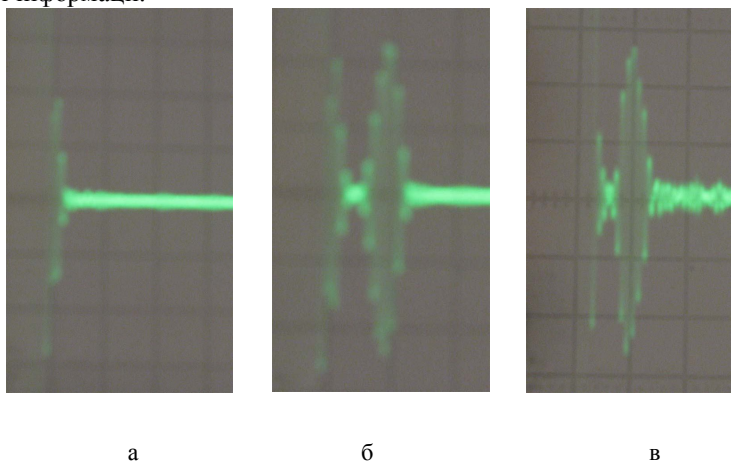


Рис. 4. Реалізації з відлуннями, отриманими новим типом ЕМАП, що може контролювати приповерхневі шари виробу без «мертвої зони». Перший сигнал на розгортці - зондуєчий

Очевидно, що вдосконалення аналогової частини ЕМА приладів дозволили наблизити їх чутливість до чутливості традиційних контактних дефектоскопів. Як показано в роботах [12-13] подальше підвищення чутливості ЕМАП приладів можливе за рахунок застосування сучасних методів формування і обробки прийнятої інформації, зокрема, кореляційний метод. Ефективність цього методу підтверджується даними, наведеними на рис. 5. Контроль вівся прямим ЕМАП імпульсами зсувних лінійно поляризованих коливань тривалістю 3 періоди частоти заповнення рівною 3,5 МГц в умовах з високим рівнем перешкод. На рис.5а показана, після попереднього підсилення, вихідна реалізація з відлунням радіосигналів від плоскодонного відбивача діаметром 3 мм, виготовленого в пофарбованому листовому зразку із сталі 09Г2С (по осі ординат показано відстань в мм, по осі абсцис - відносні одиниці). Дефект розташований на відстані 19 мм від поверхні введення ультразвукових імпульсів. Відношення амплітуди відлуння

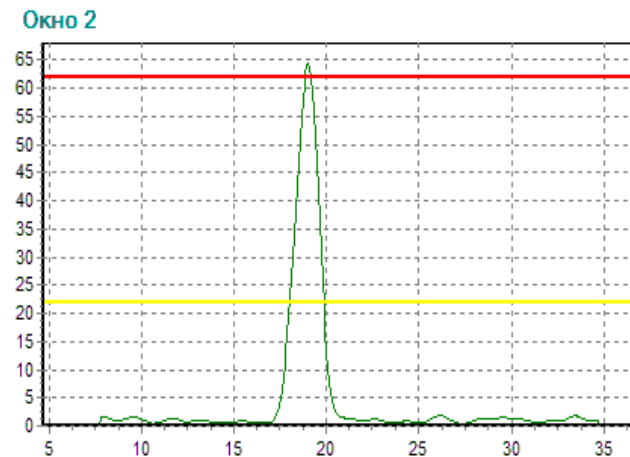
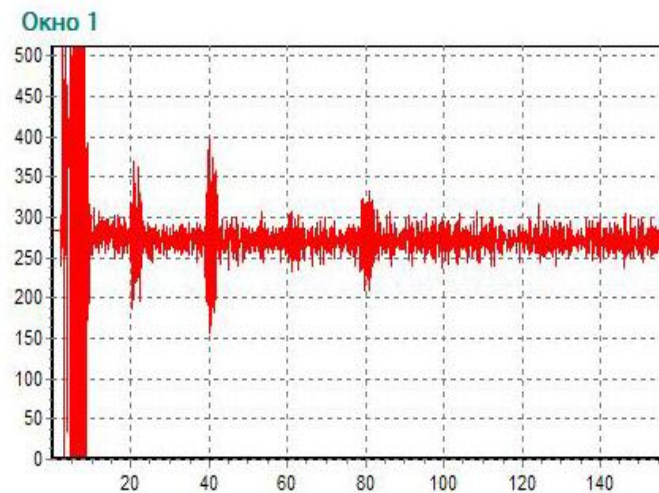


Рис. 5. Реалізації, які підтверджують ефективність використання кореляційних методів обробки інформації в приладах для ЕМА контролю
а) без обробки, б) після обробки

сигналу і шуму не перевищує 3 разів. Очевидно, що високий рівень перешкод може не дозволити виконувати якісний контроль листа. На рис.5б показано ділянку реалізації за рис.5 між зондуючим і донним імпульсом з відлунням від плоскодонного відбивача діаметром 3 мм після застосування спеціального варіанту кореляційної обробки. У результаті величина відношення амплітуд відлуння/завада збільшилася в кілька десятків разів, забезпечивши тим самим можливість ефективного ультразвукового контролю. При виконанні цих досліджень застосовано дефектоскоп ЕМА-SGM-AZ-3.

На закінчення вважаємо своїм обов'язком зазначити, що наведені результати експериментальних робіт дозволять подолати застаріле думку про низьку чутливості ЕМА способу дефектоскопії.

Висновки.

1. Сучасні ЕМА перетворювачі спільно з генераторами і попередніми підсилювачами в значному числі випадків забезпечують чутливість контролю порівнянну з чутливістю традиційних серійних ультразвукових приладів.

2. Комбінована обробка інформації, прийнятої ЕМАП, дозволяє додатково збільшити чутливість ЕМА приладів у десятки разів.

3. Застосування сучасних ЕМА перетворювачів дозволяє повністю виключити неконтрольовану приповерхневу зону металу при збереженні високої чутливості контролю.

Список літератури: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 2. Сучков Г.М. О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия, 2000, № 10, с. 67-70. 3. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. 240 с. 4. Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б. Комаров В.А. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. 1. Прямое ЭМАП в нормальном поляризующем поле // Дефектоскопия, 2006, № 10, с. 40-58. 5. Сучков Г.М. Исследование ЭМА способом выявляемости плоскодонных отражателей в образцах из различных материалов // Контроль. Диагностика, 2002, № 5, с.50 - 51. 6. Сучков Г.М. Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2005, № 2, с.36-39. 7. Сучков Г.М. Возможности современных ЭМА толщиномеров // Дефектоскопия, 2004, №12, с. 16-25. 8. Сучков Г.М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Дефектоскопия, 2005, №12, с. 24-39. 9. Астафьев А.Н., Неволин О.В., Мамай А.М. и др. Универсальная приставка для стандартных ультразвуковых дефектоскопов и толщиномеров // Дефектоскопия, 2006, №7, с. 73-82. 10. Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В. Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно – акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля, 1999, № 3, с. 18 – 20. 11. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий. Дис. на соиск. уч. степ. д.т.н., Харьков, Нац. техн. ун-т «Харьковский политехнический институт», 2005, 521 с. 12. Сучков Г.М. Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинометрии ЭМА методом // Контроль. Диагностика, 2002, № 8, с. 37–40. 13. Сучков Г.М. Обработка информации. Повышение возможностей корреляционного анализа в ЭМА - приборах // Контроль. Диагностика, 2004, № 12, с. 13–16.